

Bild 12.17 Lenkgetriebe mit OC- und CC-Hydraulik (l.) , Radkräfteaktorik (r.)

12.7.1 Radkräfteaktorik

Servoventil

Hersteller	: Mannesmann-Rexroth
Typ	: 4WS 2 EE10-45/75 B2ET210 Z8DM
Nennvolumenstrom	: 75 l/min
Eingangsdruck	: < 315 bar
Sonstiges	: Wegrückführung elektrisch, Katalogdatenblatt RD29 586/02.96

Hydraulikzylinder

Hersteller	: Hänchen Hydraulik
Typ	: A35719999
Kolben-/Kolbenst.Ø	: 40/25 mm
Kolbenweg	: ± 150 mm

Hydraulikaggregat

Hersteller	: Winkelmann GmbH
Pumpe	: Parker PAV-10RK02R2DA
Nennvolumenstrom	: 11 l/min
Dauerbetriebsdruck	: 200 bar
Sonstiges	: Hydraulisch vorgesteuerte Druckregelung, Hydraulikspeicher mit 0,75 l Nennvolumen und 80 bar Fülldruck

12.7.2 Lenkwinkelaktor und Pumpenantrieb

Servoantrieb Lenkwinkel

Hersteller	: Printed Motors Inc.
Typ	: HV-16 S-600, AC-Servoantrieb
Nenndrehmoment	: 12 Nm
Nenndrehzahl	: 3000 U/min
Sonstiges	: Servoverstärker Typ SER 610

Servoantrieb Pumpe CC-Lenksystem

Hersteller	: Printed Motors Inc.
Typ	: HV-16 L-600, AC-Servoantrieb
Nenndrehmoment	: 18 Nm
Nenndrehzahl	: 3000 U/min
Sonstiges	: Servoverstärker Typ SER 622

Pumpenantrieb OC-Lenksystem

Hersteller	: Motorenfabrik Obermoser K.G.
Typ	: Drehstrom-Asynchronmaschine
Nennleistung	: 3 kW
Nenndrehzahl	: 1420 U/min
Sonstiges	: Frequenzumrichter Typ Danfoss VLT 3022

12.7.3 Mechanischer Lenkstrang

Teilenummern BMW E46

Lenkgetriebe	: 6755064
Lenksäule	: 6764002
Lenkspindel	: 6764006
Gelenkscheibe	: 1094703

12.7.4 Hydraulik OC-Lenksystem

Fluid	: Shell Donax TC, Spezifikation Dexron - II D 21666 kinematische Zähigkeit (40°C): 38 cSt. kinematische Zähigkeit (60°C): 19 cSt. Fluidtemperatur, falls nicht anders angegeben: 60°C
Lenkhilfepumpe	: ZF-Lenksysteme, CP1, 9,8 cm ³ , BMW-Nr. 6756 611

12.7.5 Hydraulik CC-Lenksystem

Fluid	: s.o.
Radialkolbenpumpe	: LuK Fahrzeughydraulik, LFR 430, LH 2110910 Tandempumpe, Flügelzelleneinheit ausgebaut, V _{Pu} = 6,7 cm ³ (nom.), mit integriertem Saugdrosselventil (PWM-Ansteuerung)
DBV	: Mannesmann-Rexroth, DBD s6 K 18/200, hydraulisch vorgesteuertes Druckbegrenzungsventil
Bypassventil	: Sauer-Danfoss, EHV041/C5-W Bidirektionales Sitzventil

Rückschlagventil	: Parker-Ermeto, RHD10-PL, Öffnungsdruck 1 bar
Hydrospeicher (HD/ND)	: Hydac, SBO 210-075-E1-112-U-210 AB Nennvolumen 0,75 l.
Freigabeventil	: HAWE-Hydraulik, BVG 1 R - 3/8-G12
Lenkventil (Regelventil)	
Hersteller	: Bosch
Typ	: 0811 404 601
Nennvolumenstrom	: 12 l/min bei $\Delta p = 70$ bar
Eingangsdruck	: < 315 bar
Sonstiges: Proportional-Regelventil mit Nullüberdeckung	

12.7.6 Messtechnik

Die Angaben zur Genauigkeit beziehen sich stets auf das Ausgangssignal des zum Sensor gehörenden Messverstärkers.

Drucksensoren

Hersteller	: Keller Druckmesstechnik
Typ	: PA23
Messprinzip	: Piezoresistiv
Messbereich	: 0...100 bar; 0...200 bar
Genauigkeit	: 0,2% FSO

Volumenstromsensoren

Hersteller	: VSE Volutechnik
Typ	: Sensor: VS0,2 F/U-Wandler: VSE DIGFU1
Messprinzip	: Zahnrad
Messbereich	: 0,2...18 l/min
Genauigkeit	: 0,3% FSO

Drehmoment-Messwelle (Pumpenantrieb)

Hersteller	: Staiger-Mohilo
Typ	: AE-130
Messprinzip	: DMS
Messbereich	: ± 20 Nm
Genauigkeit	: 0,1% FSO

Drehmoment (Strommessung Servoantrieb)

Hersteller	: Printed Motors Inc.
Typ	: HV-16 L-600
Messprinzip	: Messung des Motorstroms
Messbereich	: ± 18 Nm
Genauigkeit	: 2% FSO

Drehzahlsensor

Hersteller	: Pepperl & Fuchs
Typ	: Sensor: OJ-500 F/U-Wandler: KFU8-FSSP-1.D
Messprinzip	: Lichtreflex-Taster
Messbereich	: 0,001...9999 Hz
Genauigkeit	: 0,2% FSO

Temperatur

Hersteller	: Jumo
Typ	: Sensor: Eigenbau, Messwiderstand PT100 Messbrücke: Jumo-Tron HROw-48/k di, d, re4
Messprinzip	: Pt 100
Messbereich	: 0...+199°C
Genauigkeit	: $\pm 0,5K$

Kraftsensor

Hersteller	: Hottinger-Baldwin-Messtechnik - HBM
Typ	: Sensor: U2A DC-Messverstärker: AE101
Messprinzip	: DMS
Messbereich	: 0...50000 kg
Genauigkeit	: 0,1 % FSO

Drehmomentsensor (Lenkmoment)

Hersteller	: Lorenz Messtechnik
Typ	: Sensor: DK15 Messverstärker: LCV-U
Messprinzip	: DMS
Messbereich	: ± 12 Nm
Genauigkeit	: 0,2% FSO

Lenkwinkelsensor

Hersteller	: Printed Motors Inc.
Typ	: HV-16 S-600
Messprinzip	: Inkrementalgeber
Genauigkeit	: 21'

Wegsensor (Zahnstangenweg)

Hersteller	: RDP electronics
Typ	: RDP DCTH 8000c
Messprinzip	: induktiv, Tauchanker
Messbereich	: ± 200 mm
Genauigkeit	: 0,5% FSO

Digitale Signalfilter

Hersteller	: AnalogDevices
Typ	: AD10-L-6-B-10K
Auflösung	: 16 bit
Filterprinzip	: Digitaler Butterworthfilter, 6. Ordnung

Digitale Messwerterfassungskarte

Hersteller	: Measurement Computing Corp.
Typ	: PCI-DAS-6402
Auflösung	: 16 bit
Summenabtastrate	: 200 kHz
Absolute Genauigkeit	: ± 3 LSB $\approx 0,046$ mV bei 10 Volt Messbereich ± 3 LSB $\approx 0,092$ mV bei 20 Volt Messbereich

Digitale Messwerterfassungskarte zur Prozessregelung

Hersteller	: National Instruments
Typ	: NI-PCI 6025E
Auflösung	: 12 bit
Summenabtastrate	: 200 kHz
Absolute Genauigkeit	: 16,504 mV

12.8 Zusätzliche Kennfelder der sauggeregelten Radialkolbenpumpe

Über die im Simulationsmodell verwendeten Kennfelder der sauggeregelten Radialkolbenpumpe hinaus werden an dieser Stelle zur ergänzenden Beschreibung der Pumpe die charakteristischen Kennlinien für die Drehmomentaufnahme und die Leistungsaufnahme dargestellt.

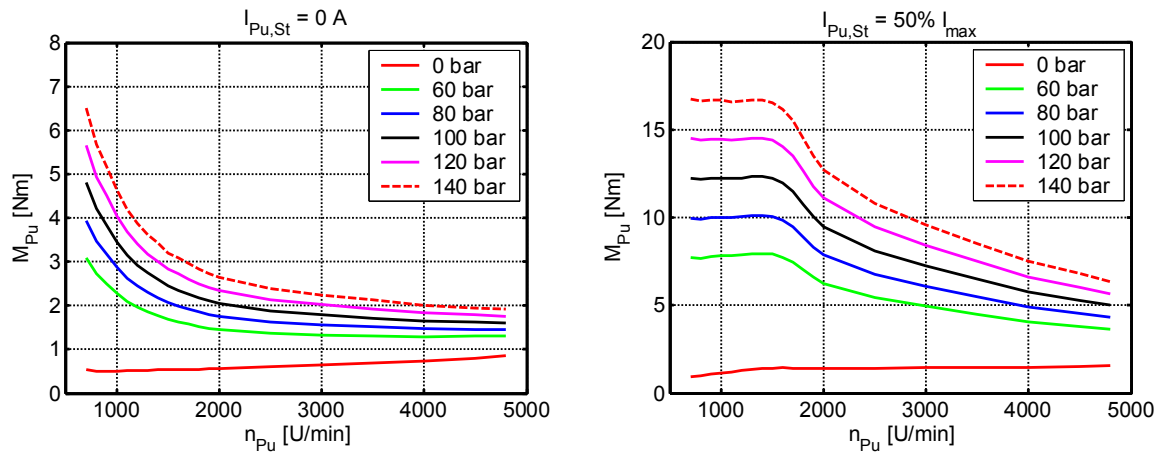


Bild 12.18 Drehmoment der Pumpe bei geschlossenem (l.) und bei vollständig geöffnetem Saugdrosselventil (r.)

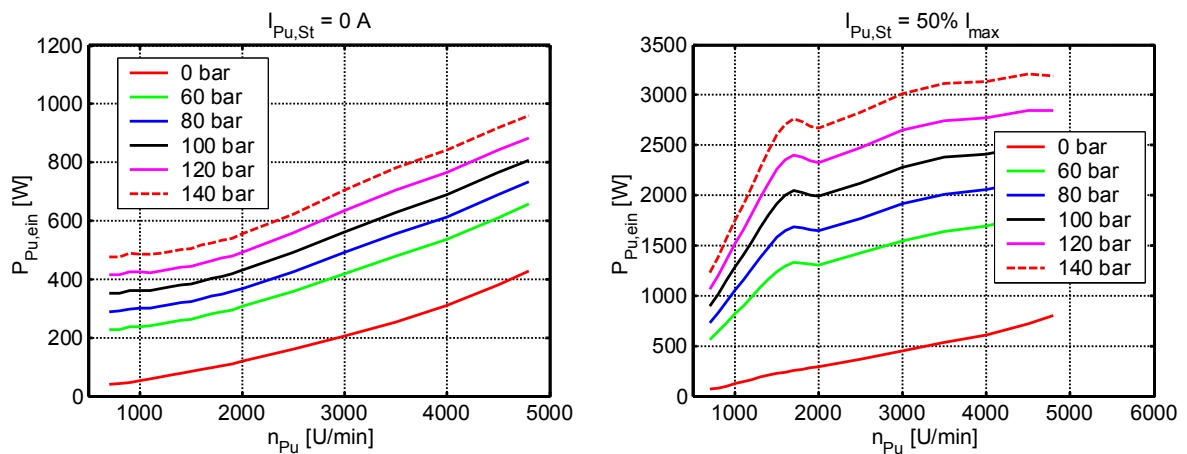


Bild 12.19 Mechanische Eingangsleistung der Pumpe bei geschlossenem (l.) und bei vollständig geöffnetem Saugdrosselventil (r.)

Anhang B

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Bild 1.1 Vier-Quadranten-Betrieb für volle Steer-by-Wire-Funktionalität	2
Bild 1.2 Erreichbarer Automatisierungsgrad heutiger Lenkhilfesysteme [40]	3
Bild 1.3 Open-Center- (l.) und Closed-Center-Hydraulik (r)	4
Bild 2.1 Open-Center-Lenkssystem mit direkt angetriebener Pumpe	7
Bild 2.2 Gemessene Lenkventilkennlinie einer konventionellen Hydrolenkung	8
Bild 2.3 Blockschaltbild des Regelkreises einer konventionellen Zahnstangen-Hydrolenkung	9
Bild 2.4 Schnitt durch das Open-Center-Lenkventil einer konventionellen Hydrolenkung [71]	10
Bild 2.5 Elektrohydraulisch angesteuerter Stromregler [35]	11
Bild 2.6 Closed-Center-Lenkssystem nach Schnelle [60]	12
Bild 2.7 Schnitt durch das von Weber [71] vorgeschlagene Drehschieberventil einer CC-Lenkung	13
Bild 2.8 Closed-Center-Lenkssystem mit elektrohydraulischen Ventilen	14
Bild 2.9 Blockschaltbild der Logik der Freigabefunktion	15
Bild 2.10 Ventilkennlinien der CC- und der OC-Lenkung	16
Bild 2.11 Regelkreis des Druckaufbaus im elektrohydraulischen Closed-Center-Lenkssystem	16
Bild 2.12 Dimensionslose isotherme Ladekurve eines Hydrospeichers [59]	17
Bild 2.13 Lenkdifferenzdruck und Speicherdruckstufen bei geschwindigkeitsabhängiger Regelung des Systemdrucks	18
Bild 3.1 Bewertungsverfahren zur Ermittlung der Bestkonfigurationen der Druckversorgung	21
Bild 3.2 Varianten der Druckregelung: A mit kontinuierlicher Sollwertvorgabe, B mit Zwei-Punkt-Regler und C als Kombination aus A und B	22
Bild 3.3 Einhubige (links) und zweihubige Flügelzellenpumpe, Ivantysyin [31]	27
Bild 3.4 Radiale und axiale Maßnahmen der Spaltkompensation [35]	27
Bild 3.5 Prinzip der Saugdrosselung [35]	28
Bild 3.6 Prinzip der aktiven Saugregelung [35]	29
Bild 3.7 Hydraulikschaltplan der Konfigurationen 1 bis 3	31

Bild 3.8	Hydraulikschaltplan der Konfigurationen 4 bis 7	32
Bild 3.9	Hydraulikschaltplan der Konfigurationen 9 und 10	33
Bild 4.1	Messgrößen des Open-Center-Lenksystems am Prüfstand	35
Bild 4.2	Drücke am OC-Lenkventil bei sinusförmigem Einlenken	36
Bild 4.3	Druckabfall am Lenkventil, Zeitverlauf (links), Abhängigkeit vom Systemdruck am Lenkventil (rechts)	36
Bild 4.4	Reibkraft an der Zahnstange über dem Summendruck im Lenkzylinder	37
Bild 4.5	Auslegungsszenario Wenden in drei Zügen	41
Bild 4.6	Grenzkurve der Minstdauer für das Lenken ohne Pumpe	43
Bild 4.7	Viskosität-Temperatur-Verhalten von Pentosin CHF 11 s [15]	46
Bild 4.8	Druckverlustkennlinie des Lenkventils mit einem Nenndurchfluss von 12 l/min	47
Bild 4.9	Verluste bei unterschiedlicher Wahl der Höhe der Druckstufe [59]	49
Bild 4.10	Zustandsänderungen des Speichergases im Auslegungsfall	51
Bild 4.11	Isentropenexponent κ von Stickstoff als Funktion der Temperatur nach Murrenhoff [43] (links), linear interpoliertes Kennfeld (rechts)	53
Bild 4.12	Erforderliches Nennvolumen des Speichers nach Auslegung	56
Bild 5.1	Übertragungselemente des mechanischen Lenkstrangs	57
Bild 5.2	Mechanisches Ersatzschaubild des Lenkstrangs	59
Bild 5.3	Ungleichförmigkeit der Lenkübersetzung durch den Kardanfehler	60
Bild 5.4	Lenkkinematik mit geometrischen Größen zur Ermittlung der Übersetzung	61
Bild 5.5	Lenkwinkel am linken Vorderrad in Abhängigkeit vom Zahnstangenweg y_{kb}	63
Bild 5.6	Rückstellkraft der Schutzbälge	64
Bild 5.7	Homogener Kreistorus zur Abschätzung des Trägheitsmoments J_R	64
Bild 5.8	Verlustquellen im Open-Center-Lenkssystem	66
Bild 5.9	Schaltbild der Flügelzellenkonstantpumpe einer konventionellen Open-Center-Lenkung	67
Bild 5.10	Volumenstromkennfeld der Pumpe im OC-Lenkssystem	69
Bild 5.11	Verlauf des Verlustmoments der Pumpe des OC-Systems	69
Bild 5.12	Hydraulische Größen zur Bestimmung der Verluste in Lenkventil und Lenkzylinder	71
Bild 5.13	Druckverlustanteile im Lenkventil der Open-Center-Lenkung	72
Bild 5.14	Druckverlust an den tankseitigen Steuerkanten des Drehschieberventils	72
Bild 5.15	Komponenten und Verlustquellen im CC-Lenkssystem mit sauggeregelter Radialkolbenpumpe	75
Bild 5.16	Mechanischer, hydraulischer und elektrischer Leistungsfluss im CC-Lenkssystem	76

Bild 5.17	Rechnerisches Verdrängungsvolumen der sauggeregelten Radialkolbenpumpe	78
Bild 5.18	Kennfeld des Verlustmoments einer Flügelzellenkonstantpumpe, $V_{pu} = 9 \text{ cm}^3$	81
Bild 5.19	Ansatz für die Polynomfunktionen S_n und S_p	85
Bild 5.20	Kennlinien des internen Leakagestroms und Kennfeld des volumetrischen Wirkungsgrads der betrachteten Modellpumpe, $V_{pu} = 9 \text{ cm}^3$	86
Bild 5.21	Verlustmoment (l.) und volumetrischer Wirkungsgrad (r) der Flügelzellenkonstantpumpe	86
Bild 5.22	Verlustmoment der Flügelzellenverstellpumpe	87
Bild 5.23	Verlustmoment bei aktiver Saugregelung (l) und passiver Saugdrosselung (r)	87
Bild 5.24	Volumetrischer Wirkungsgrad der Kolbenpumpen	87
Bild 5.25	Vergleich von reibungsfreier und reibungsbehafteter Zustandsänderung im Speicher	90
Bild 5.26	Hydraulische Größen zur Berechnung des Leistungsumsatzes in Lenkventil und Lenkzylinder	94
Bild 5.27	Generatorkennlinie	95
Bild 5.28	Einspurfahrzeug bei Kurvenfahrt [76]	97
Bild 5.29	Radlastabhängige Schlupfkennlinie in Umfangsrichtung (oben) und in Querrichtung (unten) [11]	98
Bild 5.30	Bohrmoment und Rückstellmoment am linken Vorderrad	98
Bild 5.31	Bezogener dynamischer Nachlauf und Rückstellmoment [11]	100
Bild 6.1	Verlauf der Fahrgeschwindigkeit und der Motordrehzahl des Versuchsfahrzeugs im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) [11]	102
Bild 6.2	Lenkwinkelamplitude über der Fahrgeschwindigkeit in den Realfahrzyklen und im Zyklus TFA-NEFZ	102
Bild 6.3	Verlauf des Lenkwinkels im Zyklus TFA-NEFZ	103
Bild 6.4	Routenverläufe der drei Realfahrzyklen	104
Bild 7.1	Lastleistung der untersuchten Konfigurationen im Zyklus TFA- NEFZ	107
Bild 7.2	Mittlere elektrische Leistungsaufnahme der untersuchten Konfigurationen im Zyklus TFA-NEFZ bei einer Nennleckage von 0,1 l/min	110
Bild 7.3	Maximale Lastleistung der untersuchten Konfigurationen im Zyklus TFA-NEFZ	111
Bild 7.4	Maximales Pumpenmoment der untersuchten Konfigurationen im Zyklus TFA-NEFZ	112
Bild 7.5	Relative Schalzhäufigkeit für die untersuchten Konfigurationen im Zyklus TFA-NEFZ	113

Bild 8.1	Rechnerstruktur	116
Bild 8.2	Prüfstandskonzept	117
Bild 8.3	Ist- und Sollwertverlauf der Pumpendrehzahl	118
Bild 8.4	Ist- und Sollwertverlauf des Lenkwinkels	118
Bild 8.5	Ist- und Sollwertverlauf der Zahnstangenkraft	118
Bild 8.6	Druckverlustkennlinien des Freigabeventils	121
Bild 8.7	Amplitudengang (l.) und Phasengang (r.) des Proportional-Regelventils	122
Bild 8.8	Lenkwinkel, Lenkgeschwindigkeit (l) und Ventilkennlinie (r) für unterschiedliche schnelle Lenkvorgänge, statisch (o.), langsam (m.), schnell (u.), Einlenken im Stand	123
Bild 9.1	Verdrängungsvolumen nach Toet [68]	126
Bild 9.2	Rechnerisches Verdrängungsvolumen der sauggedrosselten Pumpe	127
Bild 9.3	Volumenstromhysterese der sauggeregelten Pumpe	127
Bild 9.4	Volumenstromkennfelder der untersuchten Pumpe für unterschiedliche elektrische Steuerströme von 0 bis 60% I_{\max}	127
Bild 9.5	Volumenstrom bei 0 bar (l.) und bei 140 bar (r.)	128
Bild 9.6	Volumetrischer Wirkungsgrad der Pumpe bei geöffnetem Saugdrosselventil	128
Bild 9.7	Drehmomentkennfeld der Pumpe bei vollständig geöffneter Saugdrossel	129
Bild 9.8	Verlustmoment bei geschlossenem (l.) und bei geöffnetem Saugdrosselventil (r.)	129
Bild 9.9	Amplitudenspektrum des Drehmoments bei 1700 U/min (l.) und bei 2000 U/min (r.)	130
Bild 9.10	Kennlinien des Pumpendrucks im Bypassbetrieb	130
Bild 9.11	Steuerstromkennfeld der sauggeregelten Pumpe	130
Bild 9.12	Struktur des Leistungsreglers	132
Bild 9.13	Begrenzung der Verstellgeschwindigkeit beim Sanftanlauf	134
Bild 9.14	Validierung des Leistungsreglers; Messwerte für Drehmoment (oben), Systemdruck (Mitte) und mechanische Pumpenleistung (unten) bei Pumpendrehzahlen von 1500 U/min (l.) und 3000 U/min (r.)	136
Bild 9.15	Validierung des Leistungsreglers, Drehmomentverlauf bei unterschiedlicher Vorgabe der Lenkgeschwindigkeit	137
Bild 10.1	Vergleich von Simulation und Messung der Zeitverläufe verschiedener Größen der OC-Lenkung im Zyklus TFA-NEFZ	141
Bild 10.2	Vergleich der Pumpeneingangsleistung für das System mit und ohne Leistungsregler	147

Bild 10.3	Vergleich von Simulation und Messung der Zeitverläufe verschiedener Größen der CC-Lenkung im Zyklus TFA-NEFZ	149
Bild 12.1	Fahrgeschwindigkeit (l.) und Pumpendrehzahl (r.) im Zyklus TFA-NEFZ	164
Bild 12.2	Lenkwinkelverlauf (l.) und Zahnstangenkraft (r.) im Zyklus TFA-NEFZ	164
Bild 12.3	Fahrgeschwindigkeit (l.) und Pumpendrehzahl (r.) im Zyklus TFA-Stadt	165
Bild 12.4	Lenkwinkelverlauf (l.) und Zahnstangenkraft (r.) im Zyklus TFA-Stadt	165
Bild 12.5	Fahrgeschwindigkeit (l.) und Pumpendrehzahl (r.) im Zyklus TFA-Land	165
Bild 12.6	Lenkwinkelverlauf (l.) und Zahnstangenkraft (r.) im Zyklus TFA-Land	166
Bild 12.7	Fahrgeschwindigkeit (l.) und Pumpendrehzahl (r.) im Zyklus TFA-Autobahn	166
Bild 12.8	Lenkwinkelverlauf (l.) und Zahnstangenkraft (r.) im Zyklus TFA-Autobahn	166
Bild 12.9	Mittlere Lastleistung der untersuchten Konfigurationen der Druckversorgung im NEF-Zyklus (keine Lenkvorgänge)	167
Bild 12.10	Relative Schaltheufigkeit der untersuchten Konfigurationen der Druckversorgung im NEF-Zyklus (keine Lenkvorgänge)	168
Bild 12.11	Mittlere elektrische Steuerleistung der untersuchten Konfigurationen der Druckversorgung im NEF-Zyklus (keine Lenkvorgänge)	168
Bild 12.12	Maximales Pumpenmoment der untersuchten Konfigurationen der Druckversorgung im NEF-Zyklus (keine Lenkvorgänge)	169
Bild 12.13	Maximale Lastleistung der untersuchten Konfigurationen der Druckversorgung im NEF-Zyklus (keine Lenkbewegungen)	169
Bild 12.14	Zustandsänderungen zur Bestimmung des Neutralpunkts	170
Bild 12.15	Gesamtansicht des Prüfstandes, ohne OC-Lenkssystem	172
Bild 12.16	Prüfaufbau der sauggeregelten Radialkolbenpumpe	172
Bild 12.17	Lenkgetriebe mit OC- und CC-Hydraulik (l.) , Radkräfteaktorik (r.)	173
Bild 12.18	Drehmoment der Pumpe bei geschlossenem (l.) und bei vollständig geöffnetem Saugdrosselventil (r.)	178
Bild 12.19	Mechanische Eingangsleistung der Pumpe bei geschlossenem (l.) und bei vollständig geöffnetem Saugdrosselventil (r.)	178